

津波漂流物評価に対する粒子法の適用性検討

Applicability Evaluation of a Particle Method for Tsunami Debris

○奥野 峻也¹, 渡辺 高志¹, 戸井 隆¹
Shunya OKUNO¹, Takashi WATANABE¹, Takashi TOI¹

¹株式会社構造計画研究所 防災・環境部

Kozo Keikaku Engineering Inc., Disaster Reduction & Environmental Engineering Dept.

This study shows an applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to tsunami debris simulation. In this simulation, tsunami debris is modeled as a rigid body that consists of particles. Distinct Element Method (DEM) is applied to a collision response between rigid bodies. Obtained results with the SPH-DEM method are qualitatively in good agreement with the results of previous experiments respect to displacement and velocity of tsunami debris.

Keywords : SPH, DEM, Tsunami Debris, fluid-rigid interaction

1. はじめに

近代の津波被害では津波波力のみならず、津波漂流物の影響を無視できない。東北地方太平洋沖地震津波においても、船舶や自動車の衝突力による家屋の損壊、燃料の流出と漂流物の拡散に伴う津波火災の発生など、津波漂流物に起因する深刻な被害が発生している。国土交通省による暫定指針¹⁾においても津波避難ビル等の構造上の要件として漂流物の衝突が言及されており、津波漂流物評価の重要性が増しつつある。

そこで本研究では、流体計算に粒子法の一つであるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を、剛体間の作用力計算にDEM (Distinct Element Method) を適用し、流体剛体連成解析により津波漂流物の数値シミュレーションを行う。また既往実験との比較から解析手法の妥当性を検証した上で、漂流物の移動速度に影響を与える諸条件を調査する。

2. 流体剛体連成解析手法

本研究では、連続体と離散体の動的挙動解析コードDYBECS²⁾により計算を行う。DYBECSは液体および固体に対してSPH法を、粒状体や剛体に対してDEMを適用することで運動方程式を離散化する数値解析コードである。SPH法では次式で示されるように位置 \mathbf{x} における物理量 $\phi(\mathbf{x})$ を着目粒子 i の影響半径内の粒子物理量の重み付け和として表現する。

$$\phi(\mathbf{x}) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \phi_j W(r_{ij}, h) \quad (1)$$

m_j と ρ_j はそれぞれ近傍粒子 j の質量と密度であり、重みは粒子間距離 r_{ij} と基準距離 h の関数であるカーネル関数 $W(r_{ij}, h)$ により計算する。勾配やラプラスアンはカーネル関数自体を距離で微分することによって計算できる。本研究においてはカーネル関数として5次のB-Spline関数を用い、流体圧力はMonaghan³⁾の手法に従い陽的に計算する。剛体は粒子集合によりモデル化し、田中ら⁴⁾の手法に基づき計算を行う。剛体間における作用力はDEMと同様、粒子間にばねとダッシュポットからなるKelvin-Voigtモデルの作用力伝達系を挿入し、各成分を計算する。

3. 計算モデル

本研究では池野ら⁵⁾による実験の再現解析を行う。池野らは1/100縮尺の水理模型を用い、水路内に設けた貯水部のゲート急開により段波状の津波を発生させ、漂流物（木材）の衝突力、衝突速度、変位等を計測した。図1に実験に基づく計算体系を示す。実験と同様、貯水部の水位 H 、陸上高さ Z_T 、受波圧板からの漂流物設置位置 X_0 、漂流物代表長さ D をパラメータとして計算を行う。漂流物の形状は円柱（ D ：直径）および正方形断面を有する角柱（ D ：正方形の一辺）を想定する。漂流物を横向き（漂流物の長軸方向が受波圧板に平行）に配置する場合は図1の通り断面2次元モデルで、縦向き（漂流物の長軸方向が受波圧板に垂直）に配置する場合は24cmの奥行きを考慮した3次元モデルで計算を実施する。初期粒子間距離は2次元ケースで0.5cm、3次元ケースで1.0cmとする。また別途、漂流物を配置しない検定計算を行い、段波振幅、および漂流物設置位置における断面平均流速を算出する。

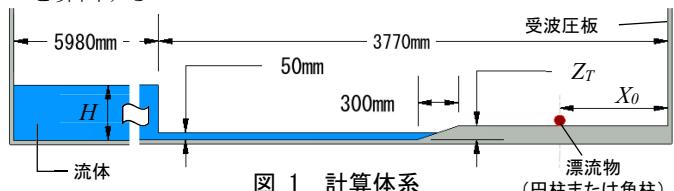


図1 計算体系

4. 解析結果

図2、図3に漂流物の時刻歴変位、および移動速度の実験との比較結果を示す。符号は受波圧板からみて上流側を正とし、変位は受波圧板を基準とした。図2は角柱を横向きに配置したケース（ $D=4.5\text{cm}$, $H=40\text{cm}$, $Z_T=10\text{cm}$, $X_0=80\text{cm}$ ）であり、変位・速度とも良い一致を得ている。図3は円柱を縦向きに配置したケース（ $D=8.0\text{cm}$, $H=40\text{cm}$, $Z_T=0\text{cm}$, $X_0=80\text{cm}$ ）で、3次元計算による結果である。変位で比較すると全体的な運動は再現できており、移動速度も実験の傾向を再現している。一方、速度のピークに関しては実験値との差異が見られる。要因としては粒子分解能の不足の他、奥行方向のモデル化の問題が挙げられる。実験での水路幅は90cmであり、計測のため漂流物を一方の壁面付近に沿わせるよう配置しているが、計算

では水路幅を24cmとし漂流物を水路の中央に配置して計算を実施した。これらモデル化の違いにより、計算では実験における壁面の影響を正しく評価できなかったと考えられる。

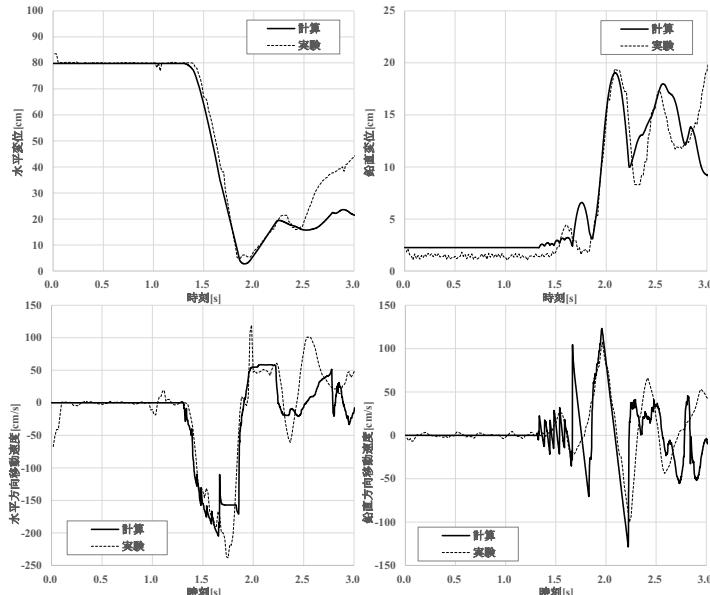


図2 角柱重心における時刻歴変位および移動速度

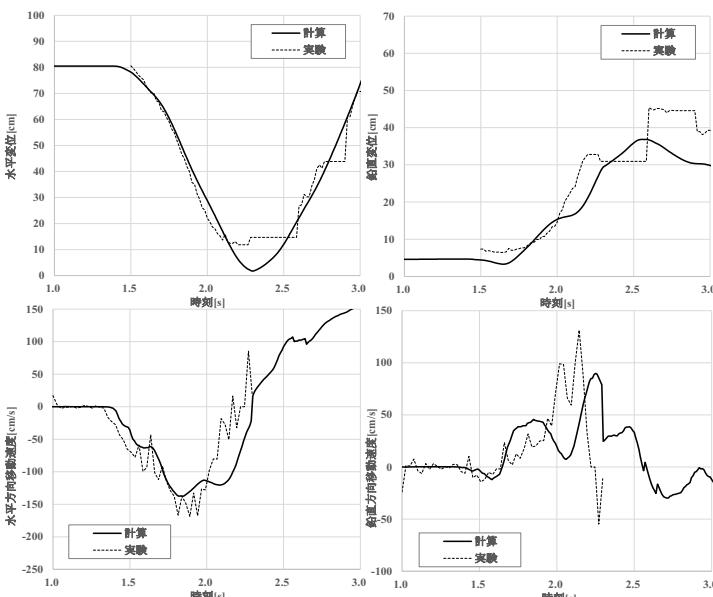


図3 円柱先端における時刻歴変位および移動速度

次に、水位として $H=40\text{cm}, 50\text{cm}, 60\text{cm}$ の3通りを与え、漂流物の位置・形状、遡上の有無が漂流物の移動速度を与える影響を2次元計算により調査した。図5に示すよう、発生する段波振幅、断面流速は概ね静水位差に比例して大きくなる。ここで、松富⁶⁾を参考に、段波の流速と漂流物の移動速度との関係をパラメータ v_f/\sqrt{gD} 、および v_r/\sqrt{gD} で整理する。 v_f は検定計算における漂流物位置における断面平均流速の最大値、 v_r は漂流物移動速度の最大値、 g は重力加速度である。図5に両パラメータで整理した結果を示す。津波が遡上しないケースに関しては、漂流物の形状や位置に関わらず高い相関が見られる。津波が遡上するケースに関しても各ケースで直線的な関係が見られるが、漂流物の位置・形状によって傾向に違いが見られる。遡上ケースに関しては漂流物の幾何形状が受圧面積や壁面との摩擦、回転の挙動にも影響するためである。一方、遡上域に存在する漂流物は背後に波圧

を受けながら津波の先端部を移動するため、付加質量が大きく構造健全性へ与える影響も大きい。したがって遡上域での漂流物の挙動の予測として、SPH-DEMに基づく検討は有効であると言える。

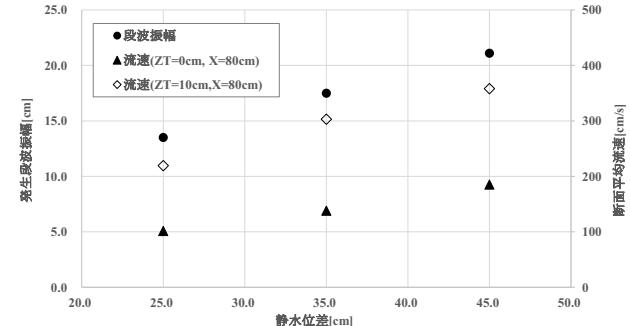


図4 静水位差による発生段波振幅と流速

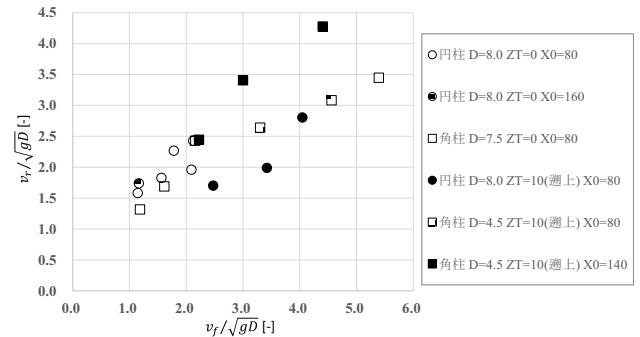


図5 段波の流速と漂流物移動速度との関係

5. 結論

SPHおよびDEMに基づく流体剛体連成解析により、漂流物の挙動を良好に再現可能なことを示した。また、計算による津波流速と漂流物の移動速度の関係を整理し、浮遊漂流物に対しては漂流物の条件によらず流速と移動速度に高い相関がある一方、漂流物が遡上域に存在する場合は漂流物形状に依存して移動速度の傾向が変化することを示した。今後は漂流物が与える衝突力に着目し、津波避難ビル等の構造物に与える影響を具体的に評価していく。

謝辞

本論文の執筆にあたり、(財)電力中央研究所の池野正明上席研究員に貴重な実験データを提供して頂きました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，<http://www.mlit.go.jp/common/000172861.pdf>
- 2) 渡辺高志、登桜正夫、嶋村洋介、榎谷浩：固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象としたSPH-FEM連成解析、第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2014
- 3) J. J. Monaghan: Simulating Free Surface Flows with SPH, Journal of Computational Physics, 110, pp.399-406, 1994
- 4) 田中正幸、酒井幹夫、越塚誠一：粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成、日本計算工学会論文集, No.20070007, 2007
- 5) 池野正明、田中寛好：段波津波による漂流物の衝突力に関する実験的研究、電力中央研究所報告 U03052
- 6) 松富秀夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性、土木学会論文集、No.621/II-47, pp.111-12, 1999